

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ  
З КУРСУ**

# **АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД**

*(для студентів 4 курсів денної та заочної форм навчання,  
а також слухачів другої вищої освіти напряму  
6.050701 "Електротехніка та електротехнології"  
зі спеціальності „Електротехнічні системи електропостачання”)*

**Харків – ХНУМГ – 2013**

Методичні вказівки до практичних занять з курсу “Автоматизований електропривод” (для студентів 4 курсів денної та заочної форм навчання, а також слухачів другої вищої освіти напряму 6.050701 "Електротехніка та електротехнології" зі спеціальності „Електротехнічні системи електроспоживання”) / Харк. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: І. Г. Абраменко, Д. І. Абраменко. – Х.: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013 – 30 с.

Укладачі: **І. Г. Абраменко,**  
**Д. І. Абраменко**

Рецензент: к.т.н., доц., П. П. Рожков

*Затверджено на засіданні кафедри “Електропостачання міст”,  
протокол № 3 від 24.11.2011 р.*

## ЗМІСТ

<b>Передмова.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Теми занять.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Механіка електроприводів.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Навантажувальні діаграми і вибір потужності двигунів приводів.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Електромеханічні властивості електроприводів постійного струму.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4. Електромеханічні властивості електроприводів змінного струму.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Методичні вказівки до розв'язання завдань.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Механіка електроприводів.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Навантажувальні діаграми й вибір потужності двигунів приводів.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3. Електромеханічні властивості електроприводів постійного струму.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4. Електромеханічні властивості електетроприводів змінного струму.....</b>	<b>25</b>
<b>Список джерел.....</b>	<b>29</b>

## ПЕРЕДМОВА

Електропривод широко використовують у різних галузях народного господарства. Це один із самих енергоємних споживачів і перетворювачів енергії. Теорія регульованого електропривода, що нараховує вже не один десяток років, постійно розвивається разом з удосконалюванням конструктивних рішень. Особливо інтенсивний розвиток вона одержала останнім часом завдяки вдосконаленню традиційних і створенню нових силових керованих напівпровідникових приладів, інтегральних схем, розвитку цифрових інформаційних технологій і розробці різноманітних систем мікропроцесорного керування.

Володіння теорією в області регульованого електроприводу є необхідним елементом технічної культури, важливою складовою професійної підготовки студентів спеціальності “Електротехнічні системи електроспоживання”.

Практикум з дисципліни «Автоматизований електропривод» відповідає навчальній програмі вивчення студентами елементів розрахунку електропривода.

Розділ 1 включає завдання з механіки й вибору потужності електроприводів, оцінці й розрахунку механічних і регульовальних характеристик електроприводів із двигунами постійного й змінного струму, в тому числі з релейним керуванням за допомогою регульованих опорів у ланцюгах електродвигунів (параметричне регулювання), а також за допомогою електромашинних систем «генератор - двигун».

Розділ 2 містить математичний апарат для розв'язання представлених завдань.

## 1. ТЕМИ ЗАНЯТЬ

### 1.1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

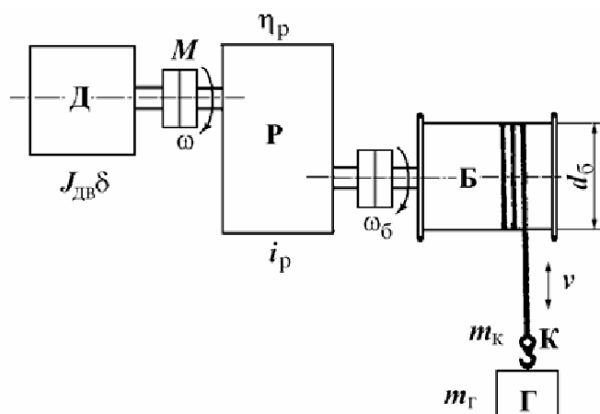


Рис. 1 – Кінематична схема вантажо-підйомної лебідки

**Завдання 1.** Лебідка для підйому вантажу (рис. 1) містить у собі барабан з канатом Б, гак К, вантаж Г, редуктор Р і двигун Д.

Дані механізму: маса вантажу  $m_G = 400$  кг; маса гака  $m_K = 100$  кг; (вага  $G_G = m_G g = 4000$  Н;  $G_K = m_K g = 1000$  Н); швидкість підйому або опускання  $v = 1$  м/с; ККД редуктора  $\eta_p = 0,5$ . Усталена кутова швидкість двигуна  $\omega = 100$  рад/с.

Момент інерції з коефіцієнтом  $\delta$ , що враховує момент інерції передачі  $J_{дв} \delta = 0,15$  кгм<sup>2</sup>.

1. Знайти приведені до вала двигуна статичний момент навантаження  $M_{c0\uparrow}$  при підйомі гака без вантажу і момент інерції гака  $J_{пр0}$ , сумарний момент інерції  $J_{\Sigma 0} = J_{дв} \delta + J_{пр0}$  і динамічний момент  $M_{дин0\uparrow}$  привода при рівномірному наростанні швидкості при пуску за  $t_{п} = 1$  с.

2. Визначити  $M_{c\uparrow}$ ,  $J_{\Sigma}$  і  $M_{дин\uparrow}$  при підйомі вантажу.

3. Визначити  $M_{c\downarrow}$  і  $M_{дин\downarrow}$  при опусканні вантажу.

4. Визначити передаточне число редуктора  $i_p$  при діаметрі барабана  $d_{\bar{c}} = 0,5$  м.

**Завдання 2.** Механізм обертової дії (рис. 2) містить у собі робочий механізм РМ, редуктор Р і двигун привода Д.

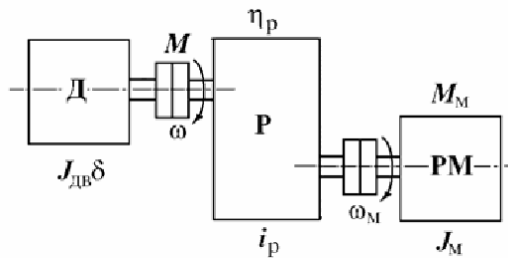


Рис. 2 - Кінематична схема механізму обертової дії з редуктором

Дані механізму:  $M_{m0} = 20$  Нм;

$M_M = 200$  Нм;  $J_M = 2$  кгм<sup>2</sup>;  $i_p = 2$ ;  $\eta_p = 0,5$ .

Двигун характеризується усталеною швидкістю  $\omega = 100$  рад/с і моментом інерції  $J_{дв\delta} = 0,5$  кгм<sup>2</sup>.

1. Знайти приведений до вала двигуна статичний момент  $M_{c0}$  при неробочому ході, момент інерції  $J_{пр0}$ , сумарний

момент інерції  $J_{\Sigma 0}$  і динамічний момент привода  $M_{дин0}$  при пуску з постійним прискоренням  $\varepsilon_{\Pi} = d\omega/dt = 50$  рад/с<sup>2</sup> ( $J_{m0} = 0$ ).

2. Визначити приведений момент  $M_c$  при роботі з навантаженням у двигуновому режимі,  $J_{пр}$ ,  $J_{\Sigma}$  і  $M_{дин}$  при  $\varepsilon_{\Pi} = d\omega/dt = 50$  рад/с<sup>2</sup>.

3. Визначити  $M_c$ ,  $J_{пр}$ ,  $J_{\Sigma}$  і  $M_{дин}$  при гальмуванні привода з постійним прискоренням  $\varepsilon_T = d\omega/dt = 50$  рад/с<sup>2</sup>.

**Завдання 3.** Визначити потужність двигуна привода лебідки (див. рис. 1) в усталеному режимі роботи. Дані привода:  $G_K = 5000$  Н;  $G_T = 15000$  Н;  $v_{\downarrow} = v_{\uparrow} = 0,5$  м/с; ККД редуктора  $\eta_p = 0,8$ ; ККД редуктора при роботі лебідки без вантажу  $\eta_0 = 0,5$ .

Знайти потужність двигуна: 1) при підйомі вантажу; 2) при підйомі гака без вантажу; 3) при опусканні вантажу; 4) при опусканні гака без вантажу.

**Завдання 4.** Визначити оптимальне передаточне число  $i_{опт}$  редуктора механізму обертової дії (див. рис. 2) при роботі на холостому ході ( $M_M = 0$ ).

Дані привода: Момент інерції механізму  $J_M = 4$  кгм<sup>2</sup>; момент інерції двигуна  $J_1 = J_{дв} + J_{муфты} = J_{дв\delta}$  з урахуванням коефіцієнта впливу інерції муфти  $\delta = 1,25$ .

Знайти  $i_{опт}$ ,  $J_{пр}$ :

1) для привода із двигуном  $J_{дв} = 0,8$  кгм<sup>2</sup>; 2) для  $J_{дв} = 0,2$  кгм<sup>2</sup>;

3) для  $J_{дв} = 0,05$  кгм<sup>2</sup>.

**Завдання 5.** Визначити час пуску й гальмування привода механізму обертового руху при постійних значеннях статичного моменту  $M_c$  і моменту двигуна  $M$  під час пуску або гальмування. Дані привода:  $J_{дв\delta} = 1$  кгм<sup>2</sup>;  $J_M = 8$  кгм<sup>2</sup>,  $i_p = 2$ ;  $\omega_{уст} = 100$  рад/с;  $M_c = 500$  Нм (момент активний).

Знайти час пуску й гальмування привода для  $\omega_{\text{нач}} = 0$  і  $\omega_{\text{уст}} = 100$  рад/с при: 1)  $M = 750$  Нм; 2)  $M = 1000$  Нм; 3)  $M = 1500$  Нм.

**Завдання 6.** Визначити необхідний момент двигуна при пуску й гальмуванні привода лебідки (див. рис.1) з постійним прискоренням  $\varepsilon = d\omega/dt = 100$  рад/с<sup>2</sup>. Дані привода:  $M_{\text{с.гр}} = 500$  Нм;  $M_{\text{с0}} = 50$  Нм;  $\omega_{\text{уст}} = 100$  рад/с;  $t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = 1$  с,  $J_{\text{дв}}\delta = 2$  кгм<sup>2</sup>;  $J_{\text{пр}} = 3$  кгм<sup>2</sup>.

Знайти  $M_{\text{п(т)}} = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}}$  при:

- 1) підйомі вантажу ( $M_{\text{п(т)}} \uparrow$ );
- 2) підйомі гака без вантажу ( $M_{\text{п0(т0)}} \uparrow$ );
- 3) зупинці привода при опусканні вантажу ( $M_{\text{п(т)}} \downarrow$ );
- 4) зупинці привода при опусканні гака без вантажу ( $M_{\text{п0(т0)}} \downarrow$ ).

ККД передач прийняти  $\eta \approx 1$ .

## 1.2. НАВАНТАЖУВАЛЬНІ ДІАГРАМИ І ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНІВ ПРИВОДІВ

**Завдання 7.** Визначити по заданим тахограмі і навантажувальній діаграмі робочої машини навантажувальну діаграму привода з попередньо обраним двигуном. Двигун привода має номінальні дані: потужність  $P_{\text{н}} = 50$  кВт; швидкість  $\omega_{\text{н}} = 100$  рад/с; момент інерції двигуна з передачею  $J_{\text{дв}}\delta = 5$  кгм<sup>2</sup>, момент  $M_{\text{н}} = P_{\text{н}}/\omega_{\text{н}} = 500$  Нм. Момент робочої машини  $M_{\text{м}} = 1250$  Нм; усталена швидкість,  $\omega_{\text{м}} = 20$  рад/с;  $\eta = 0,5$ .

Тахограма робочої машини наведена на рис. 3.

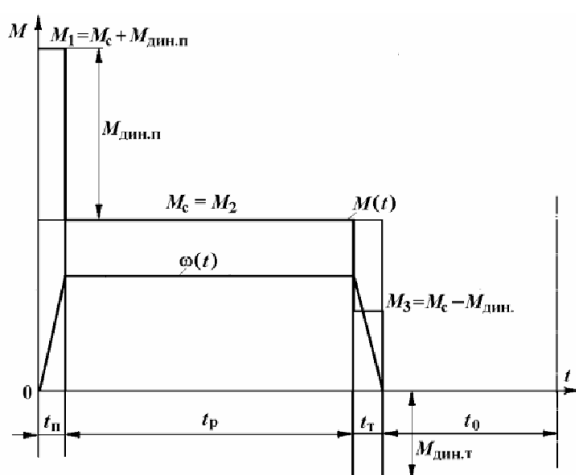


Рис. 3 - Тахограма і навантажувальна діаграма робочої машини

Час пуску  $t_{\text{п}} = 2$  с, час гальмування  $t_{\text{т}} = 2$  с, час роботи  $t_{\text{р}} = 26$  с і час паузи  $t_0 = 20$  с. Коефіцієнт погіршення тепловіддачі в періоди пуску й гальмування  $\gamma_t = 0,75$ ; коефіцієнт, що враховує погіршення теплообміну при зупинці  $\beta_t = 0,5$ .

Розрахувати й побудувати навантажувальну діаграму привода робочої машини при  $J_{\text{м}} = 62,5$  кгм<sup>2</sup>;  $J_{\text{м}} = 125$  кгм<sup>2</sup>;  $J_{\text{м}} = 250$  кгм<sup>2</sup>.

**Завдання 8.** Привод із двигуном ( $P_{\text{н}} = 15$  кВт,  $\omega_{\text{н}} = 100$  рад/с,  $M_{\text{н}} = 150$  Нм) працює за тахограмою, наведений на рис. 3. Коефіцієнт погіршення тепловіддачі в періоди пуску й гальмування

$\gamma_t = 0,75$ ; коефіцієнт, що враховує погіршення теплообміну при зупинці  $\beta_t = 0,5$ . Моменти  $M_1 = M_{\Pi} = 200$  Нм;  $M_2 = M_p = M_c = 150$  Нм;  $M_3 = M_T = -141$  Нм.

Знайти еквівалентний момент двигуна при:

1)  $t_{\Pi} = 5$  с,  $t_p = 40$  с,  $t_T = 5$  с,  $t_0 = 155$  с;

2)  $\gamma_t = 1$ ,  $\beta_t = 1$ ,  $t_0 = 75$  с.

**Завдання 9.** Привод із двигуном потужністю  $P_H = 28$  кВт при  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 25\%$  призначений для роботи в повторно-короткочасному режимі. Цикл роботи включає роботу протягом 2,5 хв із моментом на валу  $M = 300$  Нм і швидкістю 73,3 рад/с і паузи протягом  $t_0 = 5$  хв.

Перевірити правильність вибору електродвигуна.

**Завдання 10.** Визначити коефіцієнт збільшення потужності двигуна тривалого режиму при роботі в короткочасному режимі. Постійна часу нагрівання двигуна  $T_H = 60$  хв. Знайти коефіцієнт термічного й механічного перевантаження двигуна при короткочасному режимі при  $t_p = 30$  хв і  $t_p = 60$  хв (співвідношення втрат  $a_{\Pi} = 1$  і  $a_{\Pi} = 0$ ).

**Завдання 11.** Привод повторно-короткочасного режиму роботи виконаний із двигуном, що має наступні дані  $P_H = 100$  кВт,  $\text{ПВ}_{\text{СТ1}} = 40$  рад/с,  $M_H = 1000$  Нм при  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 60\%$ .

Знайти потужність  $P_{H.X}$  і номінальне значення моменту  $M_{H.X}$  при роботі привода з  $\text{ПВ}_{\text{СТ1}} = 40\%$ ; з  $\text{ПВ}_{\text{СТ2}} = 25\%$ ; з  $\text{ПВ}_{\text{СТ3}} = 15\%$ .

**Завдання 12.** Перевірити за методом еквівалентного моменту двигун привода повторно-короткочасного режиму роботи з навантажувальною діаграмою, наведеною на рис. 4.

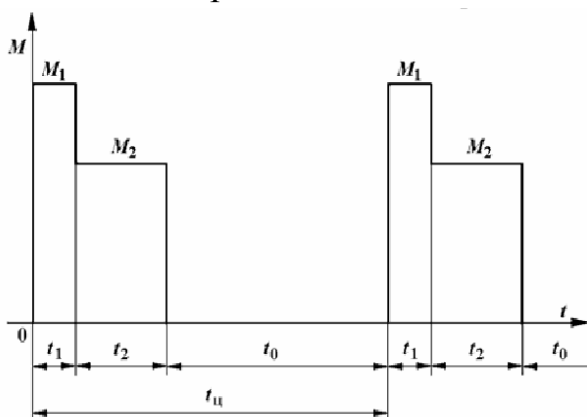


Рис. 4 – Навантажувальна діаграма повторно-короткочасного режиму

Дані привода:  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 25\%$ ;  $P_H = 2$  кВт,  $\omega_H = 100$  рад/с,  $M_H = 20$  Нм;  $t_1 = 5$  с;  $M_1 = 25$  Нм;  $t_2 = 10$  с;  $M_2 = 17$  Нм;  $t_0 = 35$  с;  $t_{II} = 50$  с.

Знайти:

1) коефіцієнт тривалості включення двигуна  $\text{ПВ}_X$ ;

2) еквівалентне значення моменту двигуна при  $\text{ПВ}_X$ ;

3) еквівалентне значення моменту двигуна при  $\text{ПВ}_{\text{СТ}} = 25\%$ .

### 1.3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Завдання 13.** Визначити параметри двигуна постійного струму за паспортними даними двигуна. Дані двигуна: потужність  $P_H = 40$  кВт, швидкість  $\omega_H = 100$  рад/с, момент  $M_H = 400$  Нм; напруга  $U_H = 220$  В; струм  $I_H = 200$  А. Збудження двигуна незалежне (паралельне). Природна характеристика й штучна характеристика при ослабленому потоці  $\Phi < \Phi_H$  двигуна показана на рис. 5.

1. Визначити номінальний опір двигуна  $R_H = U_H / I_H$ , відносний і омичний опори ланцюга якоря двигуна  $\rho$ ,  $r_{я}$ .

2. Знайти машинну постійну двигуна постійного струму (ДПС)  $c\Phi_H$  і швидкість ідеального холостого  $\omega_{0H}$ .

3. Визначити відносне падіння швидкості двигуна при номінальному навантаженні  $\Delta v_H = \Delta\omega_H / \omega_H$  (див. рис. 5).

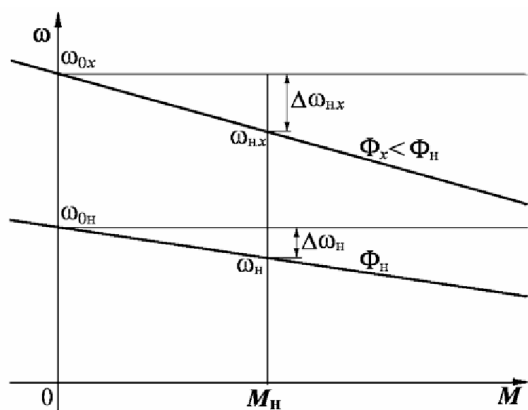


Рис. 5 - Природна й штучна характеристика ДПС при ослабленому потоці

4. Знайти відносне номінальне падіння швидкості  $\Delta v_{H.x}$  при номінальному навантаженні  $M_H$  й магнітному потоці  $\alpha_\Phi \Phi_H = 0,5\Phi_H$ .

**Завдання 14.** Визначити номінальні значення швидкості й моменту двигуна постійного струму, якщо відомі його напруга, струм, швидкість холостого ходу й опір ланцюга якоря. Дані двигуна:  $U_H = 220$  В;  $I_H = 200$  А;  $\omega_0 = 109$  рад/с;  $r_{я} = 0,05$  Ом.

Знайти: 1) машинну постійну двигуна  $c\Phi_H$ ; 2) номінальну швидкість обертання

двигуна  $\omega_H$ ; 3) номінальний електромагнітний момент двигуна  $M_H$ .

**Завдання 15.** Визначити ЕРС генератора, що живить ланцюг якоря двигуна за схемою генератор-двигун (Г-Д) (рис. 6), для одержання необхідної швидкості двигуна при заданому навантаженні.

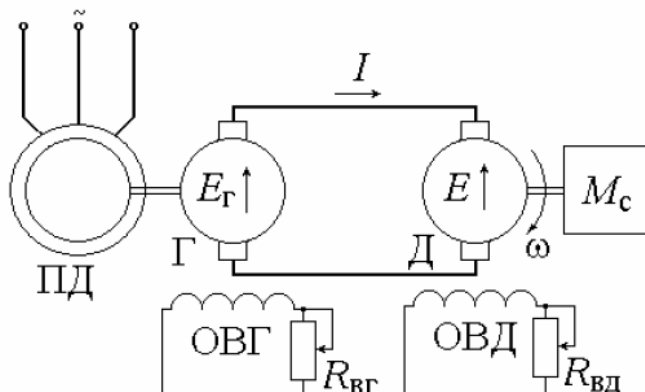


Рис. 6. - Електропривод за системою "генератор-двигун"



Дані машин системи Г-Д: генератор:  $P_{\text{нг}} = 8,8$  кВт;  $U_{\text{нг}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 40$  А;  $r_{\text{яг}} = 0,5$  Ом; двигун:  $P_{\text{нд}} = 8$  кВт;  $\omega_{\text{н}} = 90$  рад/с;  $U_{\text{нд}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 40$  А;  $r_{\text{яд}} = 0,5$  Ом.

Схема й характеристики привода Г-Д наведені на рис. 6 та рис. 7.

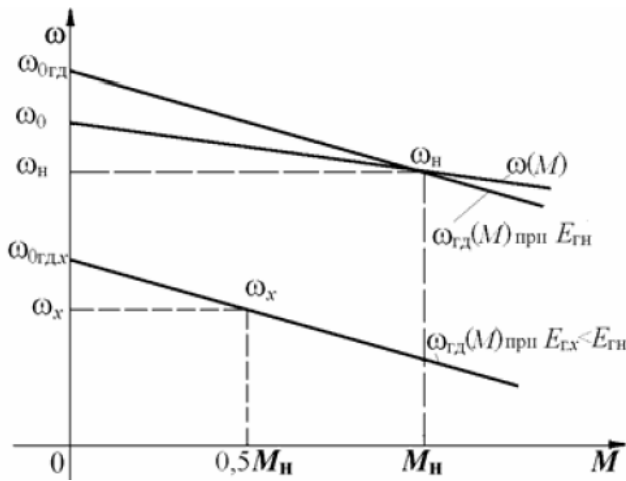


Рис. 7 - Механічні характеристики електропривода Г-Д

1. Визначити машинну постійну двигуна  $c\Phi_{\text{н}}$  і швидкість холостого ходу двигуна  $\omega_{0\text{гд}}$  в системі Г-Д.

2. Знайти номінальне значення ЕРС генератора  $E_{\text{гн}}$  для одержання номінальної швидкості двигуна  $\omega_{\text{гд}} = \omega_{\text{н}} = 90$  рад/с.

3. Знайти ЕРС генератора  $E_{\text{г.х}}$  для одержання швидкості привода в системі Г-Д  $\omega_{\text{х}} = 0,5\omega_{\text{н}}$  при  $M_{\text{с.х}} = 0,5M_{\text{н}}$ .

**Завдання 16.** Визначити від-

носний магнітний потік двигуна при

регулюванні швидкості за системою Г-Д для одержання підвищеної швидкості привода при зменшенні навантаження.

Дані машин системи Г-Д: генератор:  $U_{\text{нг}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 40$  А;  $r_{\text{яг}} = 0,05$  Ом; двигун:  $\omega_{\text{н}} = 90$  рад/с;  $U_{\text{нд}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 40$  А;  $r_{\text{яд}} = 0,05$  Ом, характеристики надані на рис. 6.

1. Знайти машинну постійну, номінальний опір двигуна, абсолютний і відносний опір ланцюга якорів системи Г-Д  $c\Phi_{\text{н}}$ ;  $R_{\text{н}}$ ;  $\rho$ .

2. Знайти зменшення відносного магнітного потоку двигуна  $\varphi_{\text{х}}$  для відносної швидкості привода  $v_{\text{х}} = 1,4$  при відносному навантаженні  $\mu_{\text{х}} = 0,5$ .

**Завдання 17.** Для привода із двигуном постійного струму незалежного збудження з реостатно-релейним керуванням (рис. 8), розрахувати величини ступенів пускових опорів.

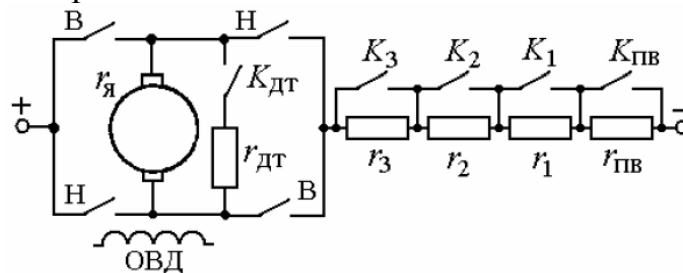


Рис. 8 - Схема електропривода з реостатно-релейним керуванням

Номінальні значення паспортних величин двигуна:  $P_{\text{н}} = 8,5$  кВт;  $U_{\text{н}} = 220$  В;  $I_{\text{н}} = 44$  А;  $\omega_{\text{н}} = 94$  рад/с. Максимальний піковий момент двигуна

при пуску  $\mu_1 = 2$ . Відносні значення моменту перемикавання ступенів пускового опору  $\mu_2 = 1$ , статичного моменту навантаження  $\mu_c = 0,8$ .

1. Визначити швидкість ідеального холостого ходу двигуна  $\omega_0$  й побудувати у відносних величинах природню механічну характеристику двигуна  $v = f(\mu)$ .

2. Знайти число ступенів пуску  $m$  й побудувати характеристики реостатного пуску (рис. 9).

3. Визначити номінальний опір двигуна  $R_H = U_H / I_H$ , опір якоря  $r_{\text{я}}$ , знайти значення ступенів  $r_1, r_2, \dots, r_m$  і повний опір пускового реостата  $r_{\text{полн}}$ .

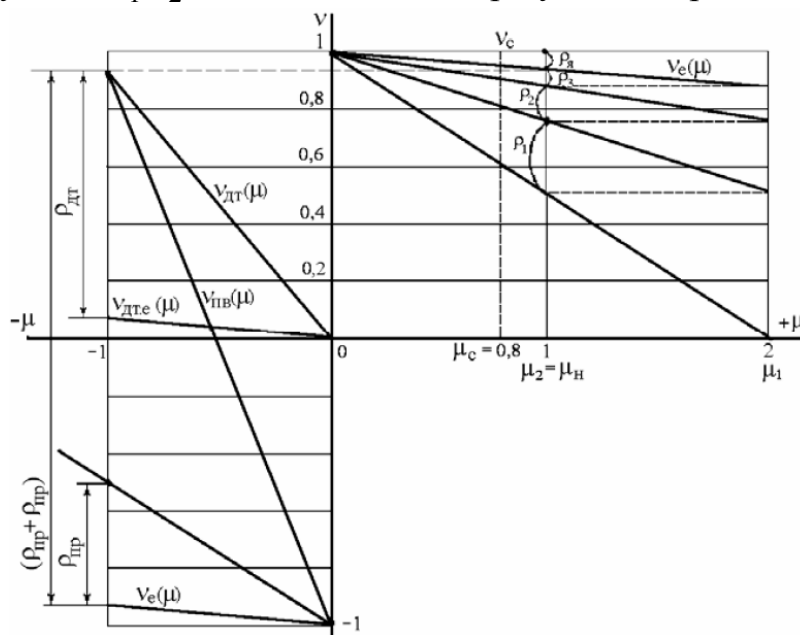


Рис. 9 - Механічні пускові й гальмові характеристики ДПС

**Завдання 18.** Для привода постійного струму з реостатно-релейним керуванням (див. рис. 8) розрахувати ступінь опору для гальмування противключенням і для динамічного гальмування. Характеристики наведені на рис. 9. Номінальні значення параметрів двигуна:  $P_H = 8,5$  кВт;  $U_H = 220$  В;  $I_H = 44$  А;  $r_{\text{я}} = 0,3$  Ом;  $\omega_0 = 100$  рад/с;  $\omega_H = 94$  рад/с. Двигун перемикається в гальмівний режим противключення або динамічного гальмування при  $\mu_c = 1$  й  $v = v_H$ . Максимальний гальмовий момент при перемикаванні  $\mu_T = 1$ . Пускові характеристики розраховані для максимального значення моменту при пуску  $\mu_1 = 2$ .

1. Визначити номінальний опір двигуна  $R_H$ , розрахувати відносний опір ланцюга якоря  $\rho = \rho_{\text{я}}$  і визначити повний (без розбивки на ступені) опір пуску  $\rho_{\text{полн}}$ .

2. Побудувати механічні характеристики двигуна  $v = f(\mu)$  у відносних величинах при перемикаванні в режим гальмування противключенням або режим динамічного гальмування.

3. Визначити величини додаткових опорів ступеня противключення й динамічного гальмування  $\rho_{\text{пв}}$  і  $\rho_{\text{дт}}$ .

**Завдання 19.** Визначити, який характер будуть мати перехідні процеси при пуску двигуна постійного струму незалежного збудження вхолосту з подачею через 2,6 с номінального моменту навантаження (рис. 10).

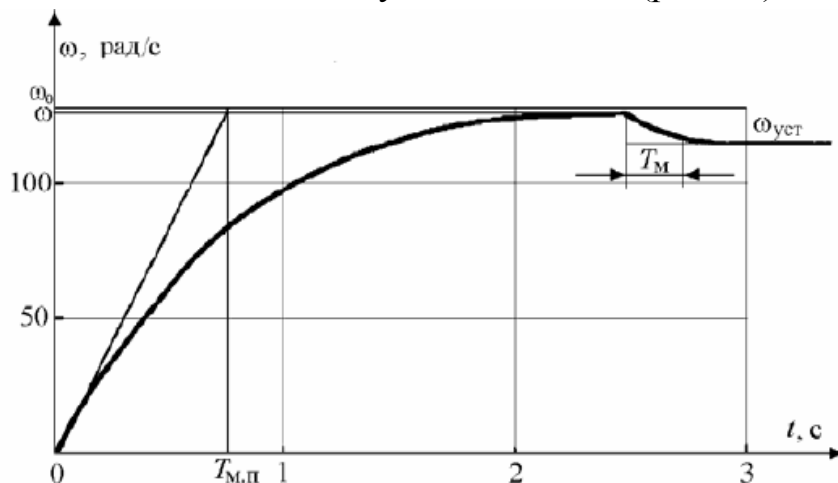


Рис. 10 - Характеристики при пуску і подачі навантаження

Пуск проводиться подачею номінальної напруги на якір двигуна із включеною обмоткою збудження. Для обмеження пускового струму в ланцюг якоря двигуна при пуску введений додатковий опір, що обмежує максимальне значення струму при пуску  $I_{\Pi} = 2,5I_H$ . Дані двигуна: потужність  $P_H = 6,5$  кВт, номінальна швидкість обертання  $\omega_H = 104,5$  рад/с, номінальна напруга  $U_H = 220$  В; номінальний струм якоря  $I_H = 33,5$  А; опір ланцюга якоря  $r_{\text{я}} = 0,77$  Ом; індуктивність якоря  $L_{\text{я}} = 0,01$  Гн; момент інерції привода  $J_{\Sigma} = 1$  кгм<sup>2</sup>.

1. Знайти електромеханічні постійні часу  $T_{\text{м.п}}$ ,  $T_{\text{м}}$  в пусковому режимі й при подачі номінального навантаження.

2. Побудувати характеристики перехідного процесу, зважаючи на те, що процес установлюється за час  $t = 3,5T_{\text{м}}$ .

#### 1.4. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

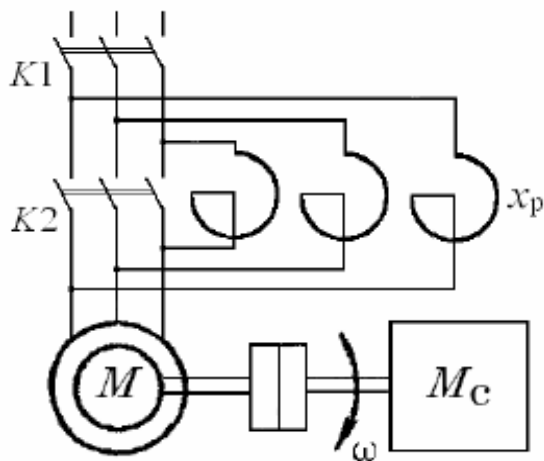


Рис. 11 - Схема реакторного пуску АД

**Завдання 20.** Для привода змінного струму відцентрового насоса із трифазним асинхронним двигуном (АД), що пускається через реактор за схемою (рис. 11), визначити величину додаткового індуктивного опору реактора  $x_p$ .

Номінальні дані асинхронного двигуна:  $P_H = 26$  кВт;  $U_H = 380$  В;  $I_H = 44$  А;  $\cos \varphi_H = 0,9$ ;  $\omega_H = 100$  рад/с;  $k_i = I_{\Pi}/I_H = 5$ ;  $k_{\text{м.к}} = M_{\text{к}}/M_H = 2$ . У режимі короткого замикання  $\cos \varphi_{\text{кз}} = 0,6$ .

Характеристики пуску показані на рис. 12.

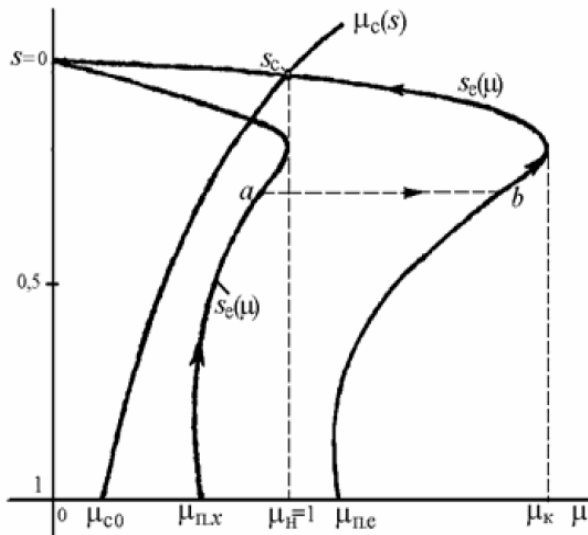


Рис. 12 - Характеристики пуску

**Завдання 21.** Знайти параметри й побудувати механічну характеристику привода з асинхронним двигуном з фазним ротором. Привод має асинхронний двигун з наступними даними:  $P_H = 28,5$  кВт;  $\omega_0 = 104,6$  рад/с;  $\omega_H = 99,4$  рад/с;  $s_H = 0,05$ ;  $U_{1H} = 380$  В;  $I_{1H} = 50$  А;  $k_{м.к} = M_K/M_H = 2,2$ ;  $r_1 = 0$ ;  $E_{2H} = 173$  В;  $I_{2H} = 100$  А.

1. Визначити номінальний момент двигуна  $M_H$ ; критичне ковзання  $s_K$  при  $M_K = 2,2M_H$  і пусковий момент  $M_{п.}$ .

2. Побудувати природню механічну характеристику для рухового режиму й оцінити відношення пускового моменту до номінального моменту  $\mu_{п.е} = M_{п.}/M_H$  двигуна.

3. Визначити номінальний опір асинхронного двигуна  $R_{2H}$ , коефіцієнт трансформації  $k_T$ , опір ротора  $r_2$ , приведений опір ротора  $r'_2$ .

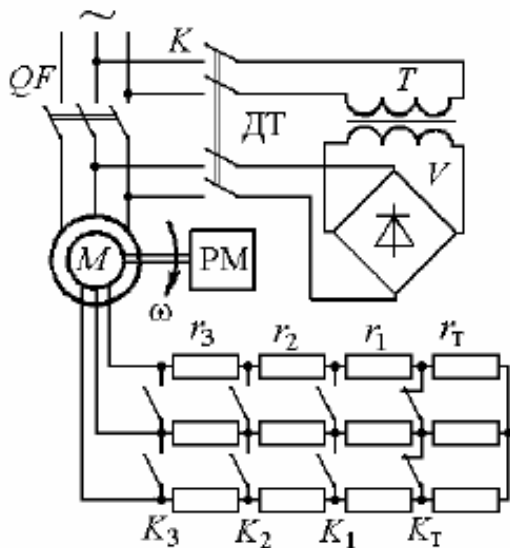


Рис. 13 - Схема реостатно-релейного пуску і гальмування

1. Знайти повний опір короткозамкненого асинхронного двигуна  $z_{кз}$  і його активну та реактивну складові  $z_{кз} = r_{кз} + jx_{кз}$ .

2. Для заданого зниження пускового моменту при реакторному пуску  $\mu_{п.х} = 0,5\mu_{п.е}$  визначити пусковий струм  $I_{п.х}$  і повний опір  $z_{кз.х}$  короткозамкненого двигуна при реакторному пуску.

3. Визначити опір реактора  $x_p$  для заданих умов пуску привода з асинхронним короткозамкненим двигуном.

**Завдання 22.** Для привода з асинхронним двигуном з фазним ротором і реостатно-релейним керуванням (рис. 13) побудувати статичні характеристики реостатного пуску й розрахувати ступені пускового реостата (рис. 14). Номінальні дані асинхронного двигуна привода:

$P_H = 22$  кВт;  $U_{1H} = 380$  В;  $I_{1H} = 50$  А;  $s_H = 0,0625$ ;  $k_{м.к} = M_K/M_H = 3$ ;  $\omega_0 = 104,5$  рад/с;  $\cos \varphi_H = 0,85$ ;  $E_{2H} = 173$  В;  $I_{2H} = 100$  А.

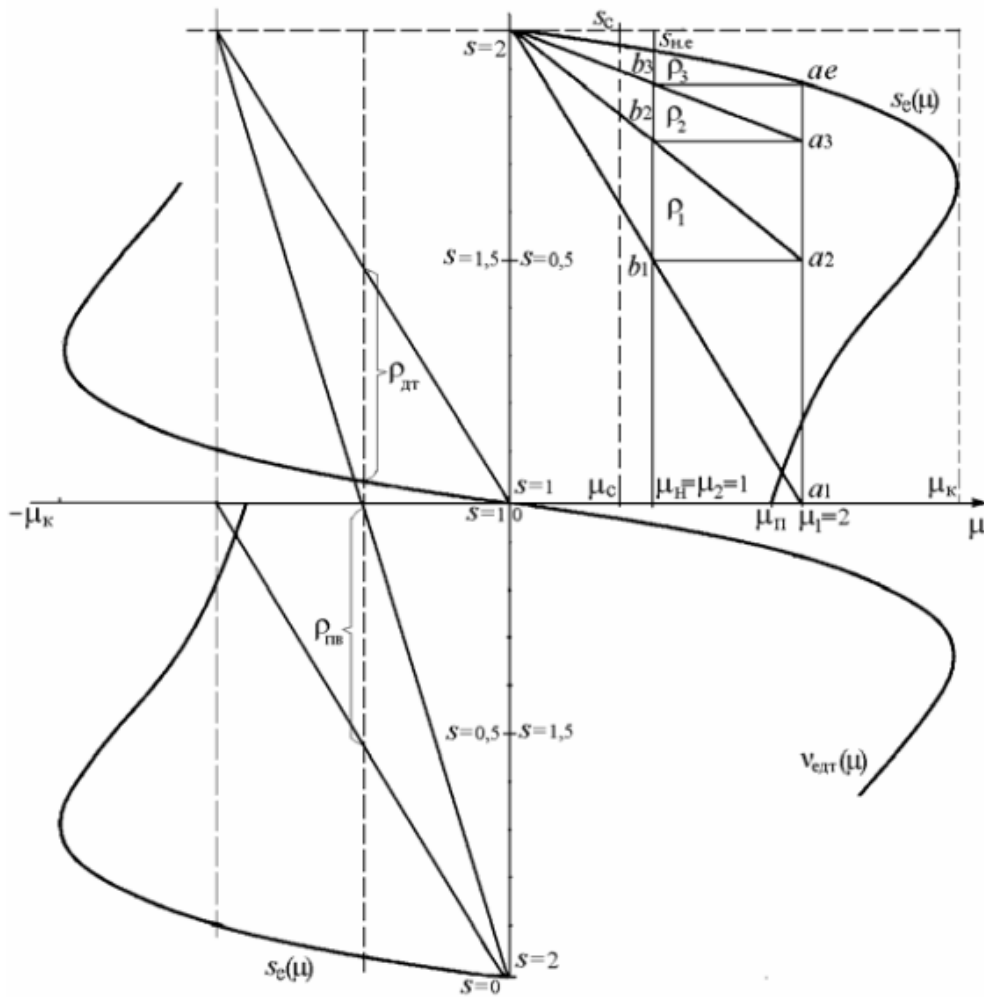


Рис. 14 - Механічні пускові і гальмові характеристики

Двигун пускається в три ступені ( $m = 3$ ) при максимальному пусковому моменті  $\mu_1 = 2$  і мінімальному  $\mu_2 = 1$ . Для динамічного гальмування двигуна обмотки статора підключаються до мережі через трансформатор Т і випрямляч V.

1. Визначити при  $r_{1s} \approx 0$ : опір ротора  $r_{2p}$  при  $s = s_H$ , повний опір пускового реостата  $r_{1+m}$  при  $s_H = 1$  і коефіцієнт співвідношення моментів двигуна при реостатному пуску  $\lambda = \mu_1 / \mu_2$ .

2. Розрахувати наближеним аналітичним методом ступені пускового реостата  $R_1, R_2, R_3$  при  $m = 3$ ,  $\lambda = 2$ .

3. Побудувати графік лінійних пускових характеристик асинхронного привода при знайдених значеннях моментів перемикання  $\mu_1, \mu_2$  і відносних опорів ступенів пускового реостата  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ .

**Завдання 23.** Визначити вид перехідних процесів і побудувати характеристики зміни моменту й швидкості двигуна при реостатно-релейному пуску привода з асинхронним двигуном при постійному моменті навантаження ( $\mu_1 = const$ ). Двигун має дані:  $P_H = 22$  кВт;  $\omega_0 = 104,5$  рад/с;  $s_H = 0,0625$ ;

$J_{\text{д}} \delta = 0,5 \text{ кгм}^2$ . Наведені параметри механізму:  $M_{\text{с}} = 0,5M_{\text{н}}$ ,  $J_{\text{пр}} = 0,5 \text{ кгм}^2$ . Привод пускається в три ступені при  $\mu_1 = 2$  й  $\mu_2 = 1$  (див. завдання 22). Механічні характеристики й характеристики пуску наведені на рис. 14 і рис. 15.

1. Знайти величину електромеханічної постійної часу привода на природній характеристиці  $T_{\text{ме}}$  і на всіх ступенях пуску  $T_{\text{м1}}, T_{\text{м2}}, T_{\text{м3}}$ .

2. Визначити час пуску на кожному реостатному ступені й повний час пуску привода  $t_{\text{п1}}, t_{\text{п2}}, t_{\text{п3}}, t_{\text{п}}$ .

3. Записати рівняння зміни швидкості і моменту двигуна на всіх ступенях пуску й побудувати динамічні характеристики зміни швидкості і моменту двигуна при пуску  $M = f(t)$  і  $\omega = f(t)$ .

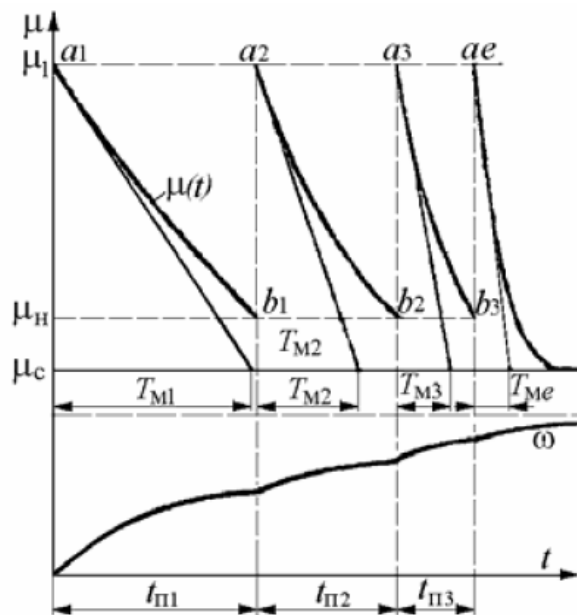


Рис. 15 - Діаграми реостатного пуску привода з АД

**Завдання 24.** Для схеми асинхронного привода з реостатним керуванням (рис. 13) визначити величину опору ступеня гальмового противключення  $r_{\text{т}} = r_{\text{пв}}$  при максимальному значенні гальмового моменту  $\mu_{\text{т1}} = 2$  і  $s_{\text{т1}} \approx 2$ . Номінальні дані двигуна привода наведено в завданні 22.

1. Побудувати графік механічних характеристик з пусковими характеристиками для  $m = 3$ ,  $\mu_1 = 2$ ,  $\mu_2 = 1$  і характеристики противключення з  $\mu_{\text{т1}} = 2$  та  $s_{\text{т1}} = 1,9375$ .

2. За графіком пускових характеристик  $m = 3$ ,  $\mu_1 = 2$ ,  $\mu_2 = 1$  і характеристики противключення  $\mu_{\text{т1}} = 2$  й  $s_{\text{т1}} = 1,9375$  визначити опір противключення  $r_{\text{т}} = r_{\text{пв}}$  (див. рис. 14).

3. Визначити повний додатковий опір у ланцюзі ротора асинхронного двигуна при перемиканні в режим противключення з  $\mu_{\text{т1}} = 2$  і  $s_{\text{т}} = 2$ ,  $r_{\Sigma \text{пв}} = r_{2\text{р.п}} + r_{\text{пв}}$ .

**Завдання 25.** Для схеми асинхронного привода з реостатним керуванням

(див. рис. 13) визначити величину напруги постійного струму, що подається замість змінного в статор двигуна, і величину опору динамічного гальмування  $r_{дт1}$  для  $\mu_{дт1} = 1$  при  $v_{дт1} = 0,9375$ . З'єднання обмоток статора - зірка. Номінальні дані двигуна привода наведено в завданні 22. Для розрахунків напруги живлення двигуна постійним струмом прийняти омичний опір фази статора двигуна  $r_{1ф} = 0,24$  Ом.

**Завдання 26.** Яку швидкість буде розвивати асинхронний двигун  $P_H = 22,5$  кВт;  $U_{1H} = 380$  В;  $\omega_1 = 157,1$  рад/с;  $\omega_H = 153,4$  рад/с;  $r_1 = 0,2$  Ом;  $r'_2 = 0,24$  Ом;  $x_1 = 0,39$  Ом;  $x'_2 = 0,46$  Ом при навантаженні номінальним моментом, якщо в ланцюг ротора включений опір, приведення якого  $r'_{2д} = 1,2$  Ом, а в ланцюг статора – індуктивний опір  $x_{1д} = 0,75$  Ом.

1. Знайти номінальний момент двигуна  $M_H$  і критичний момент  $M_{к.х}$  із додатковими опорами в ланцюзі ротора й статора.

2. Визначити критичне ковзання  $s_{к.х}$  і швидкість  $\omega_{н.х}$  при номінальному навантаженні з додатковими опорами.

## 2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ

### 2.1. МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1. Приведений до вала двигуна привода лебідки (рис. 1) момент інерції тіла (гака), що поступально рухається (при підйомі)

$$J_{пр0} = \frac{m_K v^2}{\omega^2}.$$

Сумарний приведений момент інерції механізму (лебідки) при підйомі гака

$$J_{\Sigma 0} = J_{дв} \delta + J_{пр0},$$

де  $\delta$  – коефіцієнт, що враховує момент інерції передачі.

Статичний момент, приведений до вала двигуна при підйомі гака

$$M_{дин0\uparrow} = \frac{d\omega}{dt}.$$

Динамічний момент при пуску на підйом гака без вантажу

$$M_{с0\uparrow} = J_{\Sigma 0} \frac{G_K v}{\omega \eta_p}$$

з постійним прискоренням

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_{п}}.$$

Статичний момент, приведений до вала двигуна, при підйомі гака з вантажем

$$M_{с\uparrow} = \frac{(G_K + G_{Г})v}{\omega \eta_p}.$$

Приведений до вала двигуна момент інерції гака з вантажем

$$J_{\text{пр}} = \frac{(m_{\text{к}} + m_{\text{г}})v^2}{\omega^2}.$$

Динамічний момент при рівномірному наростанні швидкості при пуску на підйом гака з вантажем за 1 с

$$M_{\text{дин}\uparrow} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}}\delta + J_{\text{пр}}$  - сумарний момент інерції механізма, приведений до вала двигуна.

Статичний момент, приведений до вала двигуна при спуску гака з вантажем

$$M_{\text{с}\downarrow} = \frac{(G_{\text{к}} + G_{\text{г}})v\eta_{\text{р}}}{\omega}.$$

Динамічний момент при рівномірному зниженні швидкості при гальмуванні гака, що опускається, з вантажем за 1 с.

$$M_{\text{дин}\downarrow} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

швидкість барабана, що встановилася,  $\omega_{\text{б}}$

$$\omega_{\text{б}} = \frac{2v}{d_{\text{б}}},$$

Передаточне число редуктора  $i_{\text{р}}$

$$i_{\text{р}} = \frac{\omega}{\omega_{\text{б}}}.$$

2. Статичний момент  $M_{\text{с0}}$  механізму обертальної дії (рис. 2), приведений до вала двигуна при холостому ході

$$M_{\text{с0}} = \frac{M_{\text{м0}}}{i_{\text{р}}\eta_{\text{р}}}.$$

Динамічний момент привода  $M_{\text{дин0}}$  при холостому пуску ( $J_{\text{м0}} = 0$ ) з постійним прискоренням  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega/dt$

$$M_{\text{дин0}} = J_{\Sigma0} \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J_{\Sigma0} = J_{\text{дв}}\delta + J_{\text{м0}}/i_{\text{р}}^2$  - сумарний момент інерції. Приведений статичний момент  $M_{\text{с}}$  при роботі з навантаженням, що має реактивний характер

$$M_{\text{с}} = M'_{\text{с}} = \frac{M_{\text{м}}}{i_{\text{р}}\eta_{\text{р}}},$$

Динамічний момент привода  $M_{\text{дин}}$  при пуску під навантаженням з постійним прискоренням  $\varepsilon_{\text{п}} = d\omega/dt$



$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}}\delta + J_{\text{м}}/i_{\text{р}}^2$  – сумарний момент інерції;  $J_{\text{м}}/i_{\text{р}}^2$  – момент інерції механізму, приведений до вала двигуна.

Динамічний момент привода  $M_{\text{дин}}$  при гальмуванні з постійним прискоренням  $\varepsilon_{\text{т}} = d\omega/dt = 50 \text{ рад/с}^2$

$$M_{\text{дин}} = -J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}}\delta + J_{\text{м}}/i_{\text{р}}^2$  – сумарний момент інерції;  $J_{\text{м}}/i_{\text{р}}^2$  – момент інерції механізму, приведений до вала двигуна.

3. Потужність двигуна привода лебідки (рис. 1) при підйомі вантажу

$$P_{\text{г}\uparrow} = \frac{(G_{\text{к}} + G_{\text{г}})v}{\eta_{\text{р}}}.$$

Потужність двигуна при підйомі гака

$$P_{\text{к}\uparrow} = \frac{G_{\text{к}}v}{\eta_0}.$$

Потужність двигуна привода при опусканні вантажу

$$P_{\text{г}\downarrow} = (G_{\text{к}} + G_{\text{г}})v\eta_{\text{р}}.$$

Потужність двигуна привода при опусканні гака

$$P_{\text{к}\downarrow} = G_{\text{к}}v\eta_0.$$

4. Оптимальне передаточне число редуктора механізму (рис. 2), виходячи з мінімального часу пуску, при  $M_{\text{с}}/M \ll 1$  ( $M_{\text{м}} = 0$ )

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{\text{м}}}{J_{\text{дв}}\delta}}.$$

Приведений момент інерції механізму

$$J_{\text{пр}} = \frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{опт}}^2}.$$

5. Сумарний приведений момент інерції механізму обертового руху

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}}\delta + \frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{р}}^2}.$$

Час пуску привода механізму обертового руху

$$J_{\text{п}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}}}{M - M_{\text{с}}}$$

Час гальмування привода механізму

$$J_{\text{т}} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{уст}} - \omega_{\text{нач}}}{M + M_{\text{с}}}.$$

6. Необхідний момент двигуна при пуску привода лебідки на підйом (рис.1)

$$M_{\Pi\uparrow} = M_c + M_{\text{дин}}.$$

Необхідний момент двигуна при гальмуванні (зупинці при спуску) привода лебідки

$$M_{\Pi\downarrow} = -M_c - M_{\text{дин}}.$$

Динамічний момент у перехідних режимах

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \varepsilon = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J_{\Sigma} = J_{\text{д}} \delta + J_{\text{пр}}$  – сумарний приведений момент інерції механізму.

## 2.2. НАВАНТАЖУВАЛЬНІ ДІАГРАМИ Й ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНІВ ПРИВОДІВ

7. Момент двигуна  $M_2$  при усталеному русі привода рівний приведеному до вала двигуна моменту робочої машини  $M_c$  (див. рис. 3) з урахуванням формули приведення моментів

$$M_2 = M_c \frac{M_{\text{м}}}{i_{\text{р}} \eta},$$

де  $i_{\text{р}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{м}}}$  – загальне передаточне число редуктора.

Момент двигуна при пуску з основного рівняння руху електропривода

$$M_1 = M_c + M_{\text{дин}} = M_c + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Прискорення згідно з тахограмою

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_{\Pi}}.$$

Сумарний момент інерції привода визначається співвідношенням

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{м}}}{i_{\text{р}}^2},$$

де  $J_{\text{м}}/i_{\text{р}}^2$  – приведений момент інерції механізму.

Момент двигуна при гальмуванні

$$M_3 = M_c - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}.$$

Затримка згідно з тахограмою

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{t_T}.$$

Еквівалентний момент двигуна, виходячи з навантажувальної діаграми, з урахуванням погіршення теплообміну

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{п}} + M_2^2 t_{\text{р}} + M_3^2 t_{\text{т}}}{(t_{\text{п}} + t_{\text{т}})\gamma_t + t_{\text{р}} + \beta_t t_0}},$$

де  $\gamma_t = 0,75$  - коефіцієнт, що враховує погіршення теплообміну при пуску й гальмуванні;  $\beta_t = 0,5$  - коефіцієнт, що враховує погіршення теплообміну при зупинці.

Еквівалентна потужність

$$P_{\text{э}} = M_{\text{э}} \omega.$$

Зіставляється величина еквівалентної потужності з паспортним значенням потужності обраного двигуна

$$P_{\text{э}} \leq P_{\text{н}}.$$

Двигун перевіряється за припустимим перевантаженням

$$\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}} = \frac{M_1}{M_{\text{э}}} \leq \lambda,$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт перевантаження по моменту обраного двигуна.

8. Еквівалентний момент двигуна із примусовою вентиляцією ( $\gamma_t = 1$ ;  $\beta_t = 1$ ) щодо заданій тахограмі й навантажувальній діаграмі (рис. 3)

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + \dots + t_N}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_{\text{п}} + M_2^2 t_{\text{р}} + M_3^2 t_{\text{т}}}{t_{\text{п}} + t_{\text{р}} + t_{\text{т}} + t_0}},$$

9. Реальна відносна тривалість включення двигуна при роботі в повторно-короткочасному режимі

$$ПВ_{\text{х}} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_0} \cdot 100.$$

Потужність на валу двигуна

$$P = M \omega.$$

У загальному випадку для визначення потужності  $P_{\text{ст}}$  потрібно привести фактичне значення  $ПВ_{\text{х}}$  до стандартного значення  $ПВ_{\text{ст}}$

$$P_{\text{ст}} = P \sqrt{\frac{ПВ_{\text{х}}}{ПВ_{\text{ст}}}}.$$

Обраний двигун повинен мати при  $ПВ_{\text{ст}}$  потужність  $P_{\text{н}}$

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{ст}}$$

10. Відношення допустимої потужності навантаження двигуна в коротко-

часному режимі  $P_K$  до номінальної потужності  $P_H$  в тривалому режимі (коефіцієнт механічного перевантаження) при співвідношенні часу роботи і постійної часу нагрівання  $t_p/T_H$

$$p_M = \frac{P_K}{P_H} = \sqrt{\frac{1 + \alpha_{\Pi}}{1 - e^{-t_p/T_H}} - \alpha_{\Pi}},$$

де  $\alpha_{\Pi}$  – відношення постійних втрат  $p_{-}$  до змінних втрат у двигуні  $p_{\sim}$ .

Залежність між коефіцієнтами механічного  $p_M$  і термічного перевантаження  $p_T$  при зневазі постійними втратами

$$p_M = \sqrt{p_T} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t_p/T_H}}}.$$

11. Номінальне значення моменту  $M_{H.X}$  для привода, що працює із тривалістю включення  $ПВ_{ст.X}$  при паспортному значенні двигуна  $ПВ_{ст}$  по формулі еквівалентного моменту

$$M_{H.X} = M_H \sqrt{\frac{ПВ_{ст}}{ПВ_{ст.X}}}.$$

Потужність при новому значенні тривалості ПВ

$$P_{H.X} = M_{H.X} \omega_H.$$

12. Фактичний коефіцієнт тривалості включення двигуна при відомій навантажувальній діаграмі (рис. 4)

$$ПВ_X = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_0} 100.$$

Еквівалентне значення моменту при  $ПВ_X$

$$M_{ПВ_X} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2}{t_1 + t_2}}.$$

Якщо фактична  $ПВ_X$  відповідає стандартній, то двигун вибирають із умови  $M_H > M_{ПВ_X}$ .

Якщо фактична  $ПВ_X$  не відповідає стандартній, еквівалентний момент приводять до стандартного (15, 25, 40, 60)%

$$M_{ст} = M_{ПВ_X} \sqrt{\frac{ПВ_X}{ПВ_{ст}}}.$$

## 2.3. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

13. За паспортними даними двигуна з незалежним (паралельним) збудженням номінальний опір двигуна  $R_H$

$$R_H = U_H / I_H.$$

Опір обмотки якоря  $r_{\text{я}}$  для двигунів середньої й великої потужності оцінюється за формулою

$$r_{\text{я}} = 0,5 \left( 1 - \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} I_{\text{н}}} \right) R_{\text{н}}.$$

При номінальному магнітному потоці  $\Phi_{\text{н}}$  машинна постійна двигуна  $c\Phi_{\text{н}}$  [Вб] зі швидкісної характеристики (рис. 5)

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - r_{\text{я}} I_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}},$$

де  $c = p_0 N / 2\pi a$  – конструктивна постійна двигуна при числі пар полюсів  $p_0$ , числі активних провідників якоря  $N$ , числі паралельних віток якоря  $a$ .

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_{0\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{c\Phi_{\text{н}}}.$$

Відносне номінальне падіння швидкості  $\Delta v_{\text{н}}$  при номінальному навантаженні  $M_{\text{н}}$

$$\Delta v_{\text{н}} = \frac{\omega_{0\text{н}} - \omega_{\text{н}}}{\omega_{0\text{н}}} = \frac{\Delta \omega_{\text{н}}}{\omega_{0\text{н}}}.$$

Швидкість ідеального холостого ходу обернено пропорційна коефіцієнту ослаблення магнітного потоку  $\alpha_{\text{ф}}$

$$\omega_{0\text{x}} = \frac{U_{\text{н}}}{\alpha_{\text{ф}} c\Phi_{\text{н}}}.$$

Відносне номінальне падіння швидкості  $\Delta v_{\text{н.х}}$  при номінальному навантаженні  $M_{\text{н}}$  і магнітному потоці  $\alpha_{\text{ф}} \Phi_{\text{н}}$

$$\Delta v_{\text{н.х}} = \frac{\Delta \omega_{\text{н.х}}}{\omega_{0\text{x}}} = \frac{r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{\omega_{0\text{x}} \left( \alpha_{\text{ф}} c\Phi_{\text{н}} \right)^2}.$$

14. Машинна постійна ДПТ, при відомій величині  $\omega_0$

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{\omega_0}.$$

Номінальна швидкість двигуна з рівняння швидкісної характеристики

$$\omega_{\text{н}} = \omega_0 - \frac{r_{\text{я}} I_{\text{н}}}{c\Phi_{\text{н}}}.$$

Номінальний момент двигуна при відомій величині  $c\Phi_{\text{н}}$

$$M_{\text{н}} = c\Phi_{\text{н}} I_{\text{н}}.$$

15. Машинну постійну двигуна  $c\Phi_{\text{н}}$  за паспортними даними визначають

за формулою

$$c\Phi_H = \frac{U_H - r_{я} I_H}{\omega_H},$$

де  $r_{я} = r_{яд}$ .

Падіння швидкості двигуна в системі Г-Д при номінальному навантаженні

$$\Delta\omega_{ГДН} = \frac{I_H (r_{яд} + r_{яГ})}{c\Phi_H},$$

де  $r_{яд}$ ,  $r_{яГ}$  – якірні опори ланцюга двигуна й генератора (рис. 6).

Швидкість холостого ходу системи Г-Д при  $E_{ГН}$  (рис. 7)

$$\omega_{0ГД} = \Delta\omega_{ГДН} + \omega_H.$$

ЕРС генератора  $E_{ГН}$  для одержання в системі Г-Д номінальної швидкості

$$E_{ГН} = \omega_{0ГД} c\Phi_H.$$

ЕРС генератора для одержання швидкості привода  $\omega_x = 0,5\omega_H$  при відносному навантаженні  $M_{с.х} = 0,5M_H$ .

$$E_{Г.х} = \omega_{0ГД.х} c\Phi_H = 0,5c\Phi_H (\omega_H + \Delta\omega_{ГДН}).$$

16. Для обчислення зменшення відносного магнітного потоку двигуна  $\varphi_x$  для заданої швидкості й навантаження привода використовують систему відносних параметрів

$$u = \frac{U}{U_H}, v = \frac{\omega}{\omega_0}, \mu = \frac{M}{M_H}, \varphi = \frac{c\Phi}{c\Phi_H} = \frac{\Phi}{\Phi_H}, \rho = \frac{r_{я}}{R_H},$$

де  $r_{я} = r_{яд} + r_{яГ}$ ;  $R_H = \frac{U_H}{I_H}$ ;  $c\Phi_H = \frac{U_H}{\omega_0}$ .

Рівняння механічної характеристики в абсолютних одиницях

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{Mr_{я}}{c^2\Phi^2}.$$

У відносних одиницях при  $U = U_H$

$$v_x = \frac{1}{\varphi_x} - \frac{\rho\mu_x}{\varphi_x^2},$$

звідки зменшення магнітного потоку двигуна ( $v_x = 1,4$ ;  $\mu_x = 0,5$ )

$$\varphi_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_H} = \frac{1 + \sqrt{1 - 4\rho v_x \mu_x}}{2v_x}.$$

17. Для розрахунків величин ступенів пускових опорів (форсований пуск) визначають наступні параметри (рис. 8):

- номінальний опір двигуна  $R_H = U_H / I_H$ ;
- опір якоря двигуна  $r_{я} = 0,5(1 - \eta)R_H$ .

Швидкість холостого ходу

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} r_{\text{я}}} \omega_{\text{н}}.$$

Машинну постійну двигуна визначають за формулою  $c\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - r_{\text{я}} I_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$

Число ступенів реостата  $m$  при заданому значенні  $\rho = r_{\text{я}}/R_{\text{н}}$  знаходять, виходячи з відношення пікових моментів до моментів перемикавання

$$\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt[m]{\frac{1}{\mu_1 \rho}}.$$

Якщо  $m$  виходить дробовим, потрібне коректування  $\mu_1, \mu_2$  при дотриманні умов:  $\mu_1 = 2 \dots 2,2$  (максимально припустиме);  $\mu_2 = (0,8 \dots 1) \mu_1$ .

Опори ступенів реостата за прийнятою величиною  $\lambda$

$$r_m = r_{\text{я}}(\lambda - 1), r_{m-1} = r_m \lambda, r_{m-2} = r_{m-1} \lambda, \dots, r_1 = r_2 \lambda.$$

Опори ступенів реостата при  $m = 3$

$$r_3 = r_{\text{я}}(\lambda - 1), r_2 = r_3 \lambda, r_1 = r_2 \lambda.$$

Відносні опори ступенів  $\rho_i = r_i/R_{\text{н}}$  (див. рис. 9).

Повний опір реостата при  $m = 3$

$$r_{\text{полн}} = r_1 + r_2 + r_3.$$

Опір якорного ланцюга

$$r_{\text{общ}} = r_{\text{я}} + r_{\text{полн}}.$$

18. Для привода постійного струму з реостатно-релейним керуванням при розрахунках величин ступенів опорів гальмування (див. рис. 8) визначаються наступні параметри

Номинальний опір двигуна  $R_{\text{н}} = U_{\text{н}}/I_{\text{н}}.$

Відносний опір ланцюга якоря

$$\rho = \frac{r_{\text{я}}}{R_{\text{н}}}.$$

Повний опір  $\rho_{\text{полн}}$

$$\rho_{\text{полн}} = \frac{c\Phi_{\text{н}} \omega_0}{\mu_1 I_{\text{н}} R_{\text{н}}} = \frac{1}{\mu_1}.$$

Величина додаткового опору (див. рис. 9) ступеня динамічного гальмування  $r_{\text{дт}}$  і  $\rho_{\text{дт}} = r_{\text{дт}}/R_{\text{н}}$

$$r_{\text{дт}} = \frac{U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я}},$$

де  $U_{\text{нач}}$  – напруга двигуна в початковий момент гальмування ( $U_{\text{нач}} \approx U_{\text{н}}$ );  $I_{\text{доп}}$  – максимально припустимий струм ( $I_{\text{доп}} \approx I_{\text{н}}, \mu_{\text{мах}} = -1$ ).

Величина додаткового опору ступеня гальмування противключенням  $r_{\text{пв}}$

$$\text{і } \rho_{\text{пв}} = r_{\text{пв}} / R_{\text{н}}$$

$$r_{\text{пв}} = \frac{U_{\text{н}} + U_{\text{нач}}}{I_{\text{доп}}} - r_{\text{я}}.$$

19. Розрахунки перехідних процесів пуску привода постійного струму вхолосту і при подачі номінального моменту навантаження (див. рис. 10) починається з визначення номінального моменту двигуна

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}}.$$

Машинна постійна двигуна при номінальному потоці

$$c\Phi_{\text{н}} = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}.$$

Швидкість холостого ходу  $\omega_{0\text{н}} = U_{\text{н}} / c\Phi_{\text{н}}$ .

Додатковий опір, що вводиться в ланцюг якоря

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{п}}} - r_{\text{я}}.$$

Максимальний момент при пуску з обмеженням струму

$$M_{\text{к}} = 2,5 M_{\text{н}}.$$

Жорсткість природньої механічної характеристики

$$\gamma_e^* = \frac{(c\Phi_{\text{н}})^2}{r_{\text{я}}}.$$

Жорсткість пускової механічної характеристики

$$\gamma_n^* = \frac{(c\Phi_{\text{н}})^2}{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}}.$$

Електромеханічна постійна часу при роботі на природній характеристиці

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\Sigma}}{\gamma_e^*}.$$

Електромеханічна постійна часу при роботі на пусковій характеристиці

$$T_{\text{м.п}} = \frac{J_{\Sigma}}{\gamma_n^*}.$$

Електромагнітна постійна часу при роботі на природній характеристиці

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}.$$

При  $T_{\text{я}} \ll T_{\text{м}}$ , першою можна зневажити.

Спільний розв'язок рівнянь руху електропривода і механічної характеристики дає рівняння перехідних процесів системи «двигун з лінійною механічною характеристикою – жорстка механічна ланка», обумовлених механічною інерційністю електропривода



$$\frac{J_{\Sigma}}{(c\Phi_{\text{H}})^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{\text{уст}},$$

де  $\omega_{\text{уст}} = \omega_0 - M_c r_{\text{я}} / (c\Phi_{\text{H}})^2$  – значення, що встановилося, швидкості електропривода після закінчення перехідного процесу  $M = M_c$

Перехідна характеристика

$$\omega = \omega_0 (1 - e^{-t/T_{\text{м.п}}}).$$

Після розгону на холостому ході при встановленні  $R_{\text{п}} = 0$ , до вала двигуна прикладений момент навантаження  $M_c = M_{\text{H}}$  (див. рис. 10). Усталене значення швидкості після прикладання навантаження

$$\omega_{\text{уст}} = \omega_0 - \frac{M_c}{\gamma_e^*}.$$

Для побудови перехідного процесу зміни швидкості, обумовленого прикладанням навантаження, використовують формулу

$$\omega = \omega_{\text{уст}} - (\omega_{\text{уст}} - \omega_0) e^{-t/T_{\text{м}}}.$$

## 2.4. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

20. Визначення опору пускового реактора (див. рис. 11) починається з розрахунків пускового струму асинхронного двигуна

$$I_{\text{п}} = k_i I_{\text{H}}.$$

Повний опір короткозамкненого асинхронного двигуна  $z_{\text{кз}}$  і його активна та реактивна складові  $z_{\text{кз}} = r_{\text{кз}} + jx_{\text{кз}}$ .

$$z_{\text{кз}} = U_{\text{H}} / (\sqrt{3} I_{\text{п}}); r_{\text{кз}} = z_{\text{кз}} \cos \varphi_{\text{кз}}; x_{\text{кз}} = \sqrt{z_{\text{кз}}^2 - r_{\text{кз}}^2}.$$

Припустимий коефіцієнт зниження пускового струму  $a_{\text{T}}$  по заданому зниженню пускового моменту  $\mu_{\text{п.х}}$  ( $\mu_{\text{п.х}} = 0,5 \mu_{\text{п.е}}$ )

$$a_{\text{T}} = \sqrt{\mu_{\text{п.х}} / \mu_{\text{п.е}}}.$$

Струм при пуску з реактором у статорному ланцюзі двигуна

$$I_{\text{п.х}} = a_{\text{T}} I_{\text{п}}.$$

Повний опір статорного ланцюга асинхронного короткозамкненого двигуна при реакторному пуску  $z_{\text{кз.х}}$

$$z_{\text{кз.х}} = U_{\text{H}} / (\sqrt{3} I_{\text{п.х}}).$$

Опір реактора  $x_{\text{р}}$  для заданих умов пуску привода з асинхронним короткозамкненим двигуном при незмінному значенні  $r_{\text{к}}$  (див.рис. 12)

$$x_{\text{р}} = \sqrt{z_{\text{кз.х}}^2 - r_{\text{к}}^2} - x_{\text{кз}}.$$

21. При визначенні параметрів механічної характеристики використовують наступні формули.

Критичний момент визначається через коефіцієнт  $k_{м.к}$  перевантаження

$$M_{к} = k_{м.к} M_{н}.$$

Критичне ковзання  $s_{к}$

$$s_{к} = s_{н} \left( k_{м.к} + \sqrt{k_{м.к}^2 - 1} \right).$$

Пусковий момент без опору в ланцюзі ротора

$$M_{п} = \frac{2M_{к}s_{к}}{1 + s_{к}}.$$

Відношення пускового моменту до номінального  $\mu_{п.е} = M_{п}/M_{н}$ .

Номінальний опір асинхронного двигуна з фазним ротором  $R_{2н}$

$$R_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3}I_{2н}}.$$

Коефіцієнт трансформації від статора до ротора

$$k_{2н} = \frac{E_{1н}}{E_{2н}} = \frac{0,95U_{1н}}{E_{2н}}.$$

Приведений опір фазного ротора

$$r'_2 = r_2 k_{т}^2 = R_{2н} s_{н} k_{т}^2.$$

22. Розрахунок пускових опорів (схема на рис. 13) наближеним методом заснований на прямолінійності робочої частини механічних характеристик АД і є аналогічним розрахунку для двигуна постійного струму при  $\rho_i = s_i$  (рис. 14).

Номінальний опір асинхронного двигуна з фазним ротором  $R_{2н}$  обчислюють за формулою  $R_{2н} = E_{2н}/(\sqrt{3}I_{2н})$ .

Активний опір ротора

$$r_{2р} = \frac{E_{2н}s_{н}}{\sqrt{3}I_{2н}}.$$

Відносне значення опору фази ротора

$$\rho = \frac{r_{2р}}{R_{2н}}.$$

При заданому числі ступенів  $m$  за формулою  $\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt[m]{\frac{1}{\mu_1 \rho}}$  перевіряється відношення моментів  $\lambda = \mu_1/\mu_2$ .

Опори ступенів реостата

$$r_m = r_{2р}(\lambda - 1), \quad r_{m-1} = r_m \lambda, \quad r_{m-2} = r_{m-1} \lambda, \dots, \quad r_1 = r_2 \lambda.$$

Опори ступенів реостата при  $m = 3$

$$r_3 = r_{2p}(\lambda - 1), \quad r_2 = r_3\lambda, \quad r_1 = r_2\lambda.$$

Повний опір пускового реостата

$$r_{п.р} = r_1 + r_2 + r_3 = \frac{E_{2H}(1 - 2s_H)}{\sqrt{3}I_{2H}\mu_1}.$$

Значення відносних опорів ступенів пускового реостата  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$

$$\rho_i = \frac{r_i}{R_{2H}}$$

Повний опір роторного ланцюга

$$r_{2p.п} = r_{2p} + r_1 + r_2 + r_3.$$

Критичне ковзання  $s_K$  для природньої характеристики визначають за формулою

$$s_K = s_H \left( k_{м.к} + \sqrt{k_{м.к}^2 - 1} \right).$$

23. При розрахунках характеристик зміни моменту й швидкості двигуна при реостатно-релейному пуску привода з асинхронним двигуном (рис. 13) значення номінальних ковзань для ступенів реостатного пуску знаходимо, виходячи з даних завдання 22 і механічних характеристик на рис. 14

$$s_{H1} = \frac{r_{2p.п}}{R_{2H}}, \quad s_{H2} = \frac{r_{2p.п} - r_1}{R_{2H}}, \quad s_{H3} = \frac{r_{2p.п} - r_1 - r_2}{R_{2H}}, \quad s_{H.e} = \frac{r_{2p}}{R_{2H}}.$$

Електромеханічні постійні часу при роботі на ступенях

$$T_{M1} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{H1}}{M_H}, \dots, \quad T_{Mi} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{Hi}}{M_H}, \quad T_{M.e} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0 s_{H.e}}{M_H}$$

Час пуску при роботі на реостатних ступенях (див. рис.15)

$$t_{п1} = T_{M1} \ln \left( \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \right), \dots, \quad t_{пи} = T_{Mi} \ln \left( \frac{\mu_1 - \mu_c}{\mu_2 - \mu_c} \right), \quad t_e = 3T_{M.e}.$$

Час реостатного пуску

$$t_{п} = t_{п1} + \dots + t_{пи} + t_e.$$

Рівняння зміни моменту і швидкості двигуна на всіх ступенях пуску за умови лінійності робочої частини механічної характеристики та постійності моменту навантаження  $\mu_c$

$$\mu = \mu_c + (\mu_1 - \mu_c)e^{-t/T_{Mi}}, \quad \omega = \omega_{уст} + (\omega_1 - \omega_{уст})e^{-t/T_{Mi}},$$

де  $\mu_1, \mu_c$  – відносні значення максимального перемикаючого моменту і моменту опору;  $\omega_1, \omega_{уст}$  – початкова та кінцева швидкість на даному ступені.

24. За умовами завдання 22 для визначення опору ступені противключення приймаємо, що механічні і пускові характеристики АД є прямолінійними. Через задану точку  $\mu_{т1}, s_{т1}$ , ( $s_{т1} \approx 2 - s_H$ ) будують промінь із точки  $s = 0$ . На перетинанні з вертикаллю номінального моменту визначається опір противключення  $\rho_{пв} = s_{пв}$  (див. рис. 13,  $\rho_{пв} \approx 1 - \rho_{п.р}$ )

$$r_T = r_{пв} = R_{2н} \rho_{пв}.$$

Повний додатковий опір у ланцюзі ротора асинхронного двигуна при противключенні

$$r_{\Sigma пв} = r_{2р.п} + r_{пв}.$$

25. Враховуючи умови завдання 22 (рис. 13), рахуємо, що для одержання  $\Phi = const$  струм двигуна рівняється  $I_{в\approx} = 0,5 I_{1н}$ .

При з'єднанні в зірку опір ланцюга збудження

$$r_{р\Delta T} = 2r_{1\phi}.$$

Постійний струм, що забезпечує те ж значення МДС, що і змінний

$$I_{вY} = 1,23 I_{в\approx}.$$

Величина напруги постійного струму, що подається замість змінного в статор двигуна

$$U_{вY} = 1,23 I_{в\approx} 2r_{1\phi}.$$

При використанні для динамічного гальмування пускового опору  $r_T (\rho_T = \rho_{\Delta T} = \rho_{пв}, \text{ див. рис. 13 та рис. 14})$

$$r_T = r_{\Delta T1} = R_{2н} \rho_{\Delta T}.$$

26. Для визначення швидкості при номінальному навантаженні АД визначають величину номінального моменту двигуна  $M_H$

$$M_H = P_H / \omega_H.$$

Критичний момент двигуна з додатковим індуктивним опором у ланцюзі статора

$$M_{к.х} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_0 \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x_2')^2} \right)}.$$

Критичне ковзання з додатковими опорами в ланцюзі статора й ротора

$$s_{к.х} = \frac{r_2' + r_{2д}'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_{1д} + x_2')^2}}$$

Ковзання  $s_{н.х}$  при номінальному навантаженні з додатковими опорами за формулою Клосса

$$M_H = 2M_K / \left( \frac{s_{к.х}}{s_{н.х}} + \frac{s_{н.х}}{s_{к.х}} \right),$$

звідки

$$s_{н.х}^2 - \frac{2M_{к.х}s_{к.х}}{M_H} s_{н.х} + s_{к.х}^2 = 0.$$

Розв'язавши рівняння, вибрати корінь  $s_{н.х}$  для режиму двигуна.

Швидкість при включених опорах

$$\omega_{н.х} = \omega_0 (1 - s_{н.х}).$$

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод. - М.: Издательский центр «Академия», 2006. 288 с.
2. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін.; За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.
3. Зеленов А.Б. Теорія електропривода, ч.1: Навч. посібник. – Алчевськ, ДонДТУ, 2005. – 382 с.
4. Электрический привод. Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет) Сост.: В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, П.В. Алексеев, Э.А. Загрянный. СПб, 2009. 49 с.

*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
до практичних занять  
з курсу

**“Автоматизований електропривод”**

*(для студентів 4 курсів денної та заочної форм навчання,  
а також слухачів другої вищої освіти  
напряму 6.050701 "Електротехніка та електротехнології"  
зі спеціальності „Електротехнічні системи електроспоживання”).*

Укладачі: **Абраменко** Іван Григорович,  
**Абраменко** Денис Іванович

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп’ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2011, поз. 240М

Підп. до друку 29.12.2011

Друк на різнографі.

Зам. №

Формат 60 x 84/16

Ум. друк. арк. 1,78

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:

ДК №4064 від 12.05.2011 р.